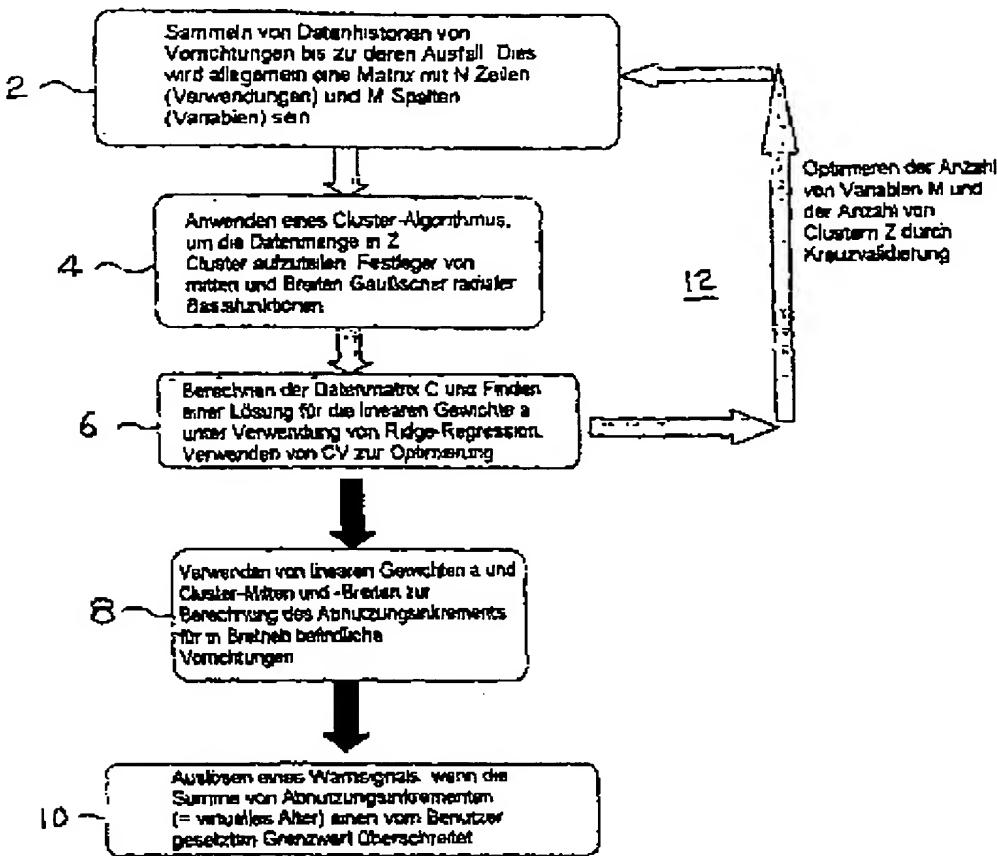


AN: PAT 2002-676263  
TI: Neural network-based method for virtual age estimation for predicting remaining lifetime of a device of a given type for predicting optimum maintenance intervals in preventative maintenance systems  
PN: DE10161633-A1  
PD: 08.08.2002  
AB: NOVELTY - Method has the following steps: monitoring of a preset number of significant parameters of the corresponding device for a training amount of device of the given type, where the parameters represent usage increments; determination of neural network coefficients with a radial base function for modeling the usage increments, that have been determined from the training quantity of devices that have been operated until failure and their virtual age normalized. A formula for the virtual age is derived from the data.; USE - Optimizing maintenance or replacement intervals for components using in medical, industrial, transport and news systems. ADVANTAGE - Predictive maintenance intervals for use in preventative maintenance are optimized. DESCRIPTION OF DRAWING(S) - Figure shows a flow diagram for virtual age estimation using a neural-network.  
PA: (SIEI ) SIEMENS CORP RES INC;  
IN: DARKEN C J; LOECHER M;  
FA: DE10161633-A1 08.08.2002;  
CO: DE;  
IC: G06G-007/48;  
MC: T01-J04A; T01-J04D; T01-J16C1;  
DC: T01;  
FN: 2002676263.gif  
PR: US255615P 14.12.2000; US0017015 14.12.2001;  
FP: 08.08.2002  
UP: 29.05.2003

## Flussdiagramm zur virtuellen Altersschätzung auf der Basis eines neuronalen Netzwerks





⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑯ Offenlegungsschrift  
⑯ DE 101 61 633 A 1

⑯ Int. Cl. 7:  
G 06 G 7/48

DE 101 61 633 A 1

⑯ Aktenzeichen: 101 61 633.3  
⑯ Anmeldetag: 14. 12. 2001  
⑯ Offenlegungstag: 8. 8. 2002

⑯ Unionspriorität: 255615 14. 12. 2000 US 017015 14. 12. 2001 US	⑯ Erfinder: Darken, Christian J., Riverton, N.J., US; Loecher, Markus, Princeton Junction, N.J., US
⑯ Anmelder: Siemens Corporate Research, Inc., Princeton, N.J., US	
⑯ Vertreter: Patentanwälte Westphal, Mussgnug & Partner, 78048 Villingen-Schwenningen	

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

- ⑯ Verfahren und Vorrichtung zum Bereitstellen einer virtuellen Altersschätzung für die Vorhersage der verbleibenden Lebensdauer eines Systems unter Verwendung eines neuronalen Netzes
- ⑯ Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters zur Vorhersage der verbleibenden Lebensdauer einer Vorrichtung eines gegebenen Typs mit folgenden Schritten: Überwachen einer vorbestimmten Anzahl signifikanter Parameter von jeweiligen Vorrichtungen einer Trainingsmenge von Vorrichtungen des gegebenen Typs, wobei die Parameter jeweils Abnutzungskomitee beitragen, Ermitteln von Koeffizienten eines neuronalen Netzes mit radialer Basisfunktion zur Modellierung der Abnutzungskomitee, die aus der Trainingsmenge ermittelt werden, die bis zum Ausfall betrieben wird, und deren virtuelle Alter im wesentlichen auf einen gewünschten Normwert normiert sind, Ableiten einer Formel für das virtuelle Alter einer Vorrichtung des gegebenen Typs aus dem neuronalen Netz mit radialer Basisfunktion und Anwenden der Formel auf die signifikanten Parameter aus einer weiteren Vorrichtung des gegebenen Typs zum Ableiten von Abnutzungskomiteen für die weitere Vorrichtung.

DE 101 61 633 A 1

## Beschreibung

- [0001] Es wird hiermit Bezug auf die folgenden gleichzeitig anhängigen Anmeldungen genommen:  
Vorläufige US-Anmeldung Nr. 60/255.615, eingereicht am 14.12.2000, betreffend NEURAL NETWORK-BASED VIRTUAL AGE ESTIMATION FOR REMAINING LIFE-TIME, im Namen von Christian Darken und Markus Loecher, Anwalts-Aktennr. 00P9072US, vorläufige US-Anmeldung Nr. 60/255.614, eingereicht am 14.12.2000, betreffend POLYNOMIAL BASED VIRTUAL AGE ESTIMATION FOR REMAINING LIFETIME PREDICTION, im Namen von Markus Loecher und Christian Darken, Anwalts-Aktennr. 00P9073US und vorläufige US-Anmeldung Nr. 60/255.613, eingereicht am 14.12.2000, betreffend MARKOV TRANSITION PROBABILITIES FOR PREDICTIVE MAINTENANCE, im Namen von Markus Loecher, Anwalts-Aktennr. 00P9074US, deren Priorität beansprucht wird und deren Offenbarungen durch Bezugnahme hier aufgenommen werden.
- [0002] Es wird auch Bezug auf die folgenden gleichzeitig anhängigen Anmeldungen genommen, die zum selben Datum wie die vorliegende Anmeldung eingereicht wurden: METHOD AND APPARATUS FOR PROVIDING A POLYNOMIAL BASED VIRTUAL AGE ESTIMATION FOR REMAINING LIFETIME PREDICTION OF A SYSTEM, im Namen von Markus Loecher und Christian Darken, Anwalts-Aktennr. 00P9073US01 und METHOD AND APPARATUS FOR PROVIDING PREDICTIVE MAINTENANCE OF A DEVICE BY USING MARKOV TRANSITION PROBABILITIES, im Namen von Markus Loecher, Anwalts-Aktennr. 00P9074US01; deren Offenbarungen werden durch Bezugnahme hierdurch hierin aufgenommen.
- [0003] Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein das Gebiet der Vorhersage eines Ausfalls und insbesondere das Ableiten einer Schätzung der verbleibenden Lebensdauer eines gattungsmäßigen Systems oder einer gattungsmäßigen Vorrichtung.
- [0004] Vorrichtungen und Geräte, die auf verschiedenen Gebieten der Medizin, der Industrie, des Transportwesens, der Nachrichtentechnik und so weiter verwendet werden, besitzen typischerweise eine bestimmte Nutz- oder Betriebslebensdauer, nach der ein Austausch, eine Reparatur oder eine Wartung erforderlich ist. Die erwartete Länge der Betriebslebensdauer ist im allgemeinen nur annähernd bekannt, und es ist nicht untypisch, dass die Möglichkeit eines frühzeitigen Ausfalls besteht. Einfache Betriebsdauerkriterien sind typischerweise ungeeignet, um rechtzeitig auf einen beginnenden Ausfall hinzuweisen. Bei einigen Anwendungen stellt der unverhoffte Ausfall von Vorrichtungen zu mindest ein Ärgernis dar; der unverhoffte Geräteausfall kann typischerweise jedoch ein größeres Ärgernis sein, das zu teuren Unterbrechungen von Diensten und der Produktion führt. In anderen Fällen kann ein derartiger unerwarteter Ausfall die Sicherheit ernsthaft beeinträchtigen und zu potentiell gefährlichen und lebensbedrohenden Situationen führen.
- [0005] Gemäß einem Aspekt der Erfindung wird eine komplexe Funktion von überwachten Variablen geschätzt und dann dazu verwendet, ihr "virtuelles Alter" zu schätzen, das dann mit einem festen Grenzwert verglichen wird.
- [0006] Gemäß einem Aspekt der Erfindung wird für die allgemeine Aufgabe der Ausfallvorhersage eine Methode verwendet, die Teil einer zustandsbasierten oder prädiktiven Wartung ist.
- [0007] Gemäß einem Aspekt der Erfindung erhöht ein Verfahren zur Schätzung des virtuellen Alters zur Vorhersage der verbleibenden Lebensdauer schrittweise ein "virtu-

- elles Alter" durch kontinuierliche Überwachung signifikanter Parameter eines Systems während zumindest eines Teils seines aktiven Lebens.
- [0008] Gemäß einem Aspekt der Erfindung wird für die funktionale Form des zustandsabhängigen virtuellen Alters oder das Abnutzungssinkrement ein neuronales Netz mit radialer Basisfunktion (RBF) genommen, dessen Koeffizienten in einer Trainingsphase erhalten werden.
- [0009] Gemäß einem Aspekt der Erfindung umfasst ein 10 Verfahren zur Schätzung des virtuellen Alters zur Vorhersage der verbleibenden Lebensdauer einer Vorrichtung eines gegebenen Typs die folgenden Schritte: Überwachen einer vorbestimmten Anzahl signifikanter Parameter der jeweiligen Vorrichtungen einer Trainingsmenge von Vorrichtungen des gegebenen Typs, wobei die Parameter jeweilige Abnutzungssinkemente beitragen, Ermitteln von Koeffizienten eines neuronalen Netzes mit radialer Basisfunktion zur Modellierung der Abnutzungssinkemente, die aus der Trainingsmenge ermittelt werden, die bis zum Ausfall betrieben 15 wird und deren virtuelle Alter im wesentlichen auf einen gewünschten Normwert normiert sind, Ableiten einer Formel für das virtuelle Alter einer Vorrichtung des gegebenen Typs aus dem neuronalen Netz mit radialer Basisfunktion und Anwenden der Formel auf die signifikanten Parameter von 20 einer weiteren Vorrichtung des gegebenen Typs zum Ableiten von Abnutzungssinkementen für die weitere Vorrichtung.
- [0010] Das Verfahren wird durch die folgende ausführliche Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen in 25 Verbindung mit der folgenden Zeichnung umfassender verständlich:
- [0011] Fig. 1 zeigt ein schematisches Flussdiagramm von Schritten gemäß den Prinzipien der Erfindung, und [0012] Fig. 2 zeigt ein Blockdiagramm von Vorrichtungen 30 gemäß den Prinzipien der Erfindung.
- [0013] In Fig. 1 umfasst Schritt 2 das Sammeln von Datenhistorien von Vorrichtungen bis zum Ausfall. Dies entspricht im allgemeinen einer Matrix mit N Zeilen (Verwendungen) und M Spalten (Variablen).
- [0014] Bei Schritt 4 wird ein Cluster-Algorithmus angewandt, um die Daten in Z-Cluster zu zerlegen. Die Mitten und Breiten von Gaußschen radialen Basisfunktionen werden festgelegt.
- [0015] Bei Schritt 6 wird die Datenmatrix C berechnet 40 und unter Verwendung der Ridge-Regression eine Lösung für die linearen Gewichte a ermittelt. Zur Optimierung wird Kreuzvalidierung verwendet.
- [0016] Bei Schritt 8 werden die linearen Gewichte a und 45 die Cluster-Mitten und -Breiten verwendet, um Abnutzungssinkemente für in Betrieb befindliche Vorrichtungen zu berechnen.
- [0017] Bei Schritt 10 wird die Summe von Abnutzungssinkementen, das heißt das virtuelle Alter, mit einem durch den Verwender spezifizierten Grenzwert verglichen und ein 50 Warnhinweis oder -signal abgegeben, wenn der Grenzwert überschritten wird.
- [0018] 12 bezeichnet allgemein die Verwendung von Kreuzvalidierung, um die Zahl von zu verwendenden Variablen M und die Zahl der Cluster zu optimieren.
- [0019] Wie in Fig. 2 gezeigt ist, ist ein Computer 20 mit 55 Daten- und Programmspeichereinrichtungen 22 und einer Quelle 26 für Programme zum Trainieren und Betreiben in iterativer Weise ausgestattet, wie sie im folgenden beschrieben wird. Bei 24 werden, wie weiter unten beschrieben wird, Daten von Trainingseinheiten bereitgestellt. Eine Vorrichtung oder ein System 28, die oder das überwacht wird, liefert mittels einer Datensammelschnittstelle 30 Daten an den Computer 20. Der Computer 20 stellt an einer Alarm-

vorrichtung 32 einen drohenden oder voraussichtlichen Alarm bezüglich des Ablaufs der Lebensdauer und/oder der Erwartung eines Ausfalls bereit.

[0020] Das Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung ist verbreitet auf vielen Gebieten einsetzbar. Um das Verstehen der Erfindung zu erleichtern und die Verwendung der vorrichtungsspezifischen Informationen und Parameter zu veranschaulichen, wird die Erfindung durch eine exemplarische, Röntgenröhren betreffende, aber keine Einschränkung darstellende Ausführungsform ausführlicher beschrieben werden. Das verwendete Beispiel ist auch insofern geeignet, als ein unerwarteter Ausfall einer derartigen Röntgenröhre beispielsweise während einer kritischen chirurgischen Behandlung so weit als möglich vermieden werden sollte.

[0021] Es sei angenommen, dass  $x_n = (x_{1,n} \dots x_{d,n})$  eine Zeitreihe von d-dimensionalen Messvektoren ist. Die individuellen Skalare  $x_i$  könnten eine beliebige Größe sein, die die Abnutzungsgeschwindigkeit oder das Altern der Vorrichtung beeinflusst, einschließlich direkt gemessener physikalischer Größen wie beispielsweise Temperatur oder Spannung oder zusammengesetzter Funktionen daraus, wie beispielsweise Leistung (Produkt aus Spannung und Strom), oder eine Temperaturdifferenz oder z. B. Steuerungsparameter wie beispielsweise Lasteinstellungen oder Betriebsdauer. Die Auswahl sowohl der Anzahl d als auch der Art der Variablen, die üblicherweise nur eine kleine Teilmenge verfügbarer Messungen darstellt, kann durch Befolgen existierender Variableneauswahltechniken erfolgen. Im Fall der Röntgenröhre stellt es sich heraus, dass es möglich war, eine erschöpfende Untersuchung durchzuführen, durch die die d einzelnen Skalare ausgewählt wurden, die den Fehler der Kreuzvalidierung (CV) minimierten, wie unten ausführlicher beschrieben werden wird.

[0022] Während der Lebensdauer der Vorrichtung wird es typischerweise viele Tausend Vektoren geben, von denen jeder ein kleines Inkrement zur gesamten Abnutzung beiträgt. Ohne dadurch Allgemeingültigkeit einzubüßen, wird hier vorgeschlagen, die Unbestimmtheit bei der Schätzung der verbleibenden Lebensdauer durch folgendes Verfahren zu reduzieren:

Das Abnutzungsincrement f() wird durch ein neuronales Netz mit radialer Basisfunktion mit M verborgenen Einheiten modelliert:

$$f(\bar{x}_n) = \sum_{i=0}^{M-1} a_i g(\bar{x}_n, \bar{z}_i, \sigma_i) \quad (1)$$

wobei g eine radialsymmetrische, bei  $z_i$  zentrierte Funktion mit dem Breitenparameter  $\sigma_i$  ist. Die Zahl der Einheiten M ist ein freier Parameter, der ebenfalls durch Kreuzvalidierung optimiert werden sollte.

[0023] Im Falle der Röntgenröhre stellt sich diese Form als optimal heraus. Allgemein kann die normierte Form

$$f(\bar{x}_n) = \sum_{i=1}^M a_i g(\bar{x}_n, \bar{z}_i, \sigma_i) / \sum_{j=0}^M g(\bar{x}_n, \bar{z}_j, \sigma_j)$$

verwendet werden. In beiden Fällen gehen die Gewichte  $a_i$  linear in diese Gleichung ein, und daher können durch Verwendung linearer Methoden Lösungen für sie werden, während die internen Parameter  $z_i$  und  $\sigma_i$  durch nichtlineare Techniken erhalten werden müssen.

[0024] Für den Fall Gaußscher Basisfunktionen, die sich als geeignet herausgestellt haben und für die Röntgenröhren verwendet wurden, gilt:

$$g(\bar{x}, \bar{z}, \sigma) = \exp\left(-\frac{\|\bar{x} - \bar{z}\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

[0025] Die  $z_i$  können durch Anwendung eines Cluster-Algorithmus, wie beispielsweise k-Mitteln, auf die Messvektoren ausgewählt werden. Die  $\sigma_i$  können auf eine von mehreren Weisen ausgewählt werden, z. B.:

- Für  $\sigma_i$  kann der Abstand von der i-ten Messung zu den erstaunlichsten (oder k-nächsten) Messungen genommen werden. Dieses Verfahren wurde für die Röntgenröhren gewählt.
- Für  $\sigma_i$  kann auch eine globale Konstante genommen werden, z. B. der Durchschnitt des Abstands jeder Messung zu der erstaunlichsten (oder k-nächsten) Messung.
- In beiden obigen Fällen kann ein Skalenfaktor angewandt werden. Dies würde einen weiteren freien Parameter  $\lambda$  ( $\sigma_i$  wird in  $\lambda\sigma_i$  überführt) einführen, der durch Kreuzvalidierung zu wählen wäre.

[0026] Man beachte, dass Gleichung (1) bequem in eine Summe von M Termen der Form

$$f(\bar{x}_n) = \sum_{j=0}^{M-1} a_j f_j(\bar{x}_n) \quad (2)$$

umgeschrieben werden kann, wobei M die Zahl der Koeffizienten  $a_j$  ist. Die Abhängigkeit von  $z_i$  und  $\sigma_i$  ist verborgen, da diese Parameter durch die oben beschriebenen Verfahren festliegen. Es verbleibt nun ein lineares Gleichungssystem.

[0027] Die M Koeffizienten  $a_j$  werden in der überwachten Trainingsphase wie folgt ermittelt:

[0027] Es sei angenommen, dass es N Vorrichtungshistoren von Röhren, die letztlich ausfüllen, gibt, die mit k indiziert sind. Dies bildet die Trainingsmenge. Durch  $L_k$  sei die Anzahl der Vektoren für jede Vorrichtung bezeichnet. Für jede Vorrichtung berechnet man die M unabhängigen Summen über alle Abnutzungsinkremente, die naturgemäß von den M unbekannten Koeffizienten abhängen:

$$C_{k,j} = \sum_{n=1}^{L_k} f_j(\bar{x}_n^k)$$

[0028] Dies ergibt eine ( $N \times M$ )-Matrix  $(C)_{kj}$  und N Gleichungen für das virtuelle Alter jeder Vorrichtung, die die Form

$$(virtuelles Alter)_k = \sum_{j=0}^{M-1} a_j C_{k,j}$$

besitzen. Idealerweise sollten die virtuellen Alter jeder Vorrichtung identisch sein, beispielsweise Eins. Um die besten Gewichte zu finden, so dass alle virtuellen Alter so nah wie möglich an einer beliebigen Konstante (hier wird 1 gewählt) liegen, wird vorgeschlagen, die Funktion des Kriteriums der kleinsten quadratischen Fehlersumme zu minimieren:

$$J(\bar{a}) = \|\bar{C} \bullet \bar{a} - \bar{1}\|^2 + \lambda \bar{a}^T \bar{B} \bar{a}$$

[0029] Der erste Term auf der rechten Seite entspricht der gewöhnlichen linearen Kleinsten-Fehlerquadrat-Regres-

sion. Der zusätzliche  $\lambda$  beinhaltende Term soll die Verallgemeinerbarkeit verbessern und eine Überanpassung verhindern. Diese Technik ist in der einschlägigen Literatur als Ridge-Regression bekannt. Der Parameter  $\lambda$  sollte durch Kreuzvalidierung optimiert werden. Die Matrix B ist positiv definiert und für die Röntgenröhren wurde die Einheitsmatrix angenommen.

[0030] Im Falle von fehlenden Daten, d. h. falls für eine bestimmte Vorrichtung z nur ein Bruchteil  $f_k$  von Daten verfügbar ist, muss man den konstanten Vektor 1 durch den geräteabhängigen Vektor f ersetzen:

$$J(\bar{a}) = \left\| \bar{C} \cdot \bar{a} - \bar{f} \right\|^2 + \lambda \bar{a}^T \bar{B} \bar{a}$$

[0031] Gemäß der Ausführungsform der Erfindung wird vorgeschlagen, nach der Ermittlung der Koeffizienten a für die N Vorrichtungen in der Trainingsmenge die verbleibende Lebensdauer der Vorrichtungen in der gleichen Familie zu schätzen, indem die inkrementale (und resultierende kumulierte) Abnutzung gemäß Gleichung (2) berechnet wird. Da das virtuelle Alter auf Eins (1) normiert wurde, ergibt die kumulierte Abnutzung direkt den Bruchteil der Lebensdauer, der abgelaufen ist.

[0032] Als nächstes wird die Anwendbarkeit der Prinzipien der Kreuzkorrelation im Kontext der vorliegenden Erfindung angesprochen. K-fache Kreuzvalidierung ist eine wohl bekannte Technik, um den Testfehler eines Prädiktors zu schätzen, wenn die verfügbare Datenmenge (Größe n) zu klein ist, um die Aufspaltung in Trainings- und Testmengen zu erlauben. Stattdessen wird der Aufteilungsvorgang wiederholt, indem man von den Daten einen "kleinen" Teil von k Elementen abteilt und die verbleibenden n-k Elemente zum Training verwendet. Die Testfehler auf der kleinen k-Menge werden dann gemittelt, um den k-fachen Kreuzvalidierungsfehler zu ergeben. Für das Beispiel der Röntgenröhren umfasste die Datenmenge annähernd 70 Röhren (n~70), und es wurde k-1-5 gewählt.

[0033] Es versteht sich, dass die Erfindung auf viele Weisen unter Verwendung von Hardware- und Softwaretechniken implementiert werden kann. Die Implementierung mittels eines programmierbaren digitalen Computers ist mit oder ohne Hinzufügung ergänzender Gerätschaften geeignet. Es kann auch ein dafür ausgelegtes System mit einem dafür ausgelegten programmierten Computer und geeigneten Peripheriegeräten verwendet werden. Wenn verschiedene Funktionen und Unterfunktionen als Software implementiert sind, werden nachfolgende Änderungen und Verbesserungen an der Arbeitsweise ohne weiteres implementiert.

[0034] Obschon die vorliegende Erfindung anhand veranschaulicher Ausführungsformen beschrieben wurde, versteht es sich für einen Fachmann, dass verschiedene Änderungen und Modifizierungen vorgenommen werden können, ohne vom Erfindungsgedanken abzuweichen. Derartige Änderungen und Modifizierungen sollen vom Schutzzumfang der folgenden Ansprüche umfasst werden.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters zur Vorhersage der verbleibenden Lebensdauer einer Vorrichtung eines gegebenen Typs mit folgenden Schritten:

Überwachen einer vorbestimmten Anzahl signifikanter Parameter von jeweiligen Vorrichtungen einer Trainingsmenge von Vorrichtungen des gegebenen Typs, wobei die Parameter jeweils Abnutzungskremente

beitragen,

Ermitteln von Koeffizienten eines neuronalen Netzes mit radialer Basisfunktion zur Modellierung der Abnutzungskremente, die aus der Trainingsmenge ermittelt werden, die bis zum Ausfall betrieben wird und deren virtuelle Alter im wesentlichen auf einen gewünschten Normwert normiert sind,

Ableiten einer Formel für das virtuelle Alter einer Vorrichtung des gegebenen Typs aus dem neuronalen Netz mit radialer Basisfunktion und

Anwenden der Formel auf die signifikanten Parameter aus einer weiteren Vorrichtung des gegebenen Typs zum Ableiten von Abnutzungskrementen für die weitere Vorrichtung.

2. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 1 einschließlich eines Schritts des Kumulierens der weiteren Vorrichtung, um die Schätzung eines virtuellen Alters für die weitere Vorrichtung abzuleiten.

3. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 1 einschließlich eines Schritts des Auswählens der vorbestimmten Zahl signifikanter Parameter durch Auswahl einer Anzahl von ihnen, um die Abweichungen der virtuellen Alter von dem normierten virtuellen Alter zu minimieren.

4. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters für Vorrichtungen eines gegebenen Typs durch Vorhersage der verbleibenden Lebensdauer einer weiteren Vorrichtung eines gegebenen Typs durch Berechnen von Abnutzungskrementen mit folgenden Schritten:

Sammeln von Daten über zu Abnutzungskrementen beitragende Parameter in einer Trainingsmenge von Mustervorrichtungen bis zum Ausfall, wobei die Mustervorrichtungen der gegebenen Vorrichtung ähnlich sind,

Modellieren eines Abnutzungskrements durch ein neuronales Netz mit radialer Basisfunktion,

Berechnen der Summe der Inkremente für einzelne Mustervorrichtungen in der Trainingsmenge, um für diese ein virtuelles Alter zu erhalten, wobei das virtuelle Alter im wesentlichen auf ein geeignetes normiertes virtuelles Alter normiert wird, und

Ermitteln von Koeffizienten des neuronalen Netzes mit radialer Basisfunktion in einer überwachten Trainingsphase für die Mustervorrichtungen in der Trainingsmenge für das normierte virtuelle Alter und

Ableiten von Abnutzungskrementdaten für eine weitere, den Mustervorrichtungen gleichende Vorrichtung unter Verwendung von Vorrichtungsdaten für die weitere Vorrichtung in Verbindung mit den Koeffizienten des neuronalen Netzes mit radialer Basisfunktion, die in dem vorhergehenden Schritt ermittelt wurden.

5. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters für Vorrichtungen nach Anspruch 4 einschließlich eines Schritts des Kumulierens der Abnutzungskrementdaten, um ein virtuelles Alter für die weitere Vorrichtung zu berechnen.

6. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters für Vorrichtungen nach Anspruch 4, wobei der Schritt des Ermittlens von Koeffizienten des neuronalen Netzes mit radialer Basisfunktion einen Schritt des Optimierens der Ermittlung durch Verwendung der Ridge-Regression umfasst.

7. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters für Vorrichtungen nach Anspruch 6, wobei der die Ridge-Regression verwendende Schritt einen Schritt des Optimierens durch Kreuzvalidierung

zwischen Vorrichtungen in einer Untermenge der Trainingsmenge und dem Rest der Vorrichtungen in der Trainingsmenge umfasst.

8. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters für Vorrichtungen nach Anspruch 6, wobei der Schritt des Ermittelns von Koeffizienten des neuronalen Netzes mit radialer Basisfunktion einen Schritt des Optimierens der Koeffizienten zur Reduzierung der Abweichungen der virtuellen Alter von dem normierten virtuellen Alter beinhaltet.

9. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters für Vorrichtungen nach Anspruch 6, wobei der Schritt des Optimierens der Koeffizienten einen Schritt des Minimierens der Summe kleinster Quadrate der Abweichungen beinhaltet.

10. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters für Vorrichtungen durch Vorhersage der verbleibenden Lebensdauer einer gegebenen Vorrichtung durch Berechnen von Abnutzungsinkrementen mit folgenden Schritten:

Modellieren der Abnutzungsinkremente durch ein neuronales Netz mit radialer Basisfunktion basierend auf ausgewählten Abnutzungsparametern, die Abnutzungsinkremente für die Vorrichtung beitragen,

Anpassen der Koeffizienten des neuronalen Netzes mit radialer Basisfunktion entsprechend den Daten, die in einer Trainingsmenge derartiger Vorrichtungen abgeleitet wurden, um eine Gleichung für Inkremente des virtuellen Alters jeder Vorrichtung in der Trainingsmenge abzuleiten, wobei die virtuellen Alter im wesentlichen auf einen gewünschten Standardwert normiert werden, und

Anwenden der Gleichung auf die ausgewählten Abnutzungsparameter einer weiteren Vorrichtung, die den Vorrichtungen in der Trainingsmenge gleicht, um Abnutzungsinkremente für die weitere Vorrichtung zu berechnen.

11. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters für Vorrichtungen nach Anspruch 10 einschließlich eines Schritts des Kumulierens der Abnutzungsinkremente für die weitere Vorrichtung, um ein virtuelles Alter für die weitere Vorrichtung zu berechnen.

12. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters für Vorrichtungen nach Anspruch 10, wobei der Schritt des Ermittelns von Koeffizienten des neuronalen Netzes mit radialer Basisfunktion einen Schritt des Optimierens des Ermittelns durch Verwendung der Ridge-Regression umfasst.

13. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters für Vorrichtungen nach Anspruch 12, wobei der der Ridge-Regression verwendende Schritt einen Schritt des Optimierens durch Kreuzvalidierung zwischen Vorrichtungen in einer Untermenge der Trainingsmenge und dem Rest der Vorrichtungen in der Trainingsmenge beinhaltet.

14. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters für Vorrichtungen nach Anspruch 10, wobei der Schritt des Ermittelns von Koeffizienten des mehrdimensionalen neuronalen Netzes mit radialer Basisfunktion einen Schritt des Optimierens der Koeffizienten zur Reduzierung der Abweichungen der virtuellen Alter von dem normierten virtuellen Alter beinhaltet.

15. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters für Vorrichtungen nach Anspruch 14, wobei der Schritt des Optimierens der Koeffizienten einen Schritt des Minimierens der Summe kleinster Qua-

drate der Abweichungen beinhaltet.

16. Vorrichtung zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters einer Vorrichtung eines gegebenen Typs mit:

Mitteln zum Überwachen einer vorbestimmten Anzahl signifikanter Parameter einer jeweiligen Vorrichtung aus einer Trainingsmenge von Vorrichtungen des gegebenen Typs, wobei die Parameter jeweilige Abnutzungsinkremente beitragen,

Mitteln zum Ermitteln von Koeffizienten eines neuronalen Netzes mit radialer Basisfunktion zur Modellierung der Abnutzungsinkremente, die aus der Trainingsmenge ermittelt werden, die bis zum Ausfall betrieben wird, und deren virtuelle Alter im wesentlichen auf einen gewünschten Normwert normiert sind,

Mitteln zum Ableiten einer Formel für das virtuelle Alter einer Vorrichtung des gegebenen Typs aus dem neuronalen Netz mit radialer Basisfunktion und

Mitteln zum Anwenden der Formel auf die signifikanten Parameter aus einer weiteren Vorrichtung des gegebenen Typs zum Ableiten von Abnutzungsinkrementen für die weitere Vorrichtung.

17. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters einer Vorrichtung mit folgenden Schritten:

Überwachen einer Vielzahl signifikanter variabler Parameter einer Vorrichtung während des aktiven Betriebs des Systems,

Auswählen zumindest einer Teilmenge der Vielzahl signifikanter variabler Parameter und Bilden einer Reihe d-dimensionalen, Skalare umfassender Messvektoren daraus, die jeweils der mindestens einen Teilmenge signifikanter variabler Parameter entsprechen,

Ableiten von den Skalaren entsprechenden jeweiligen Abnutzungsinkrementen,

Modellieren der Abnutzungsinkremente durch ein neuronales Netz mit einer radialen Basisfunktion mit M verborgenen Einheiten, wobei M ein freier Parameter ist, woraus sich ein lineares Gleichungssystem ergibt, Ermitteln von M Koeffizienten in einer überwachten Trainingsphase, die N Historien von Vorrichtungen beinhaltet, die ausfüllen,

Berechnen der M unabhängigen Summen über alle Abnutzungsinkremente für jede Vorrichtung, wodurch eine (NxM)-Matrix und N Gleichungen für das virtuelle Alter jeder Vorrichtung erhalten werden, und Berechnen eines virtuellen Alters für jede Vorrichtung aus der (NxM)-Matrix und den N Gleichungen.

18. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 17 einschließlich eines Schritts der Normierung des virtuellen Alters auf eine gegebene Zahl.

19. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 17 einschließlich eines Schritts der Normierung des virtuellen Alters auf Eins.

20. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters durch Vorhersage der verbleibenden Lebensdauer einer Vorrichtung mit folgenden Schritten:

Überwachen einer Vielzahl signifikanter variabler Parameter einer Vorrichtung während des aktiven Betriebs des Systems,

Auswählen zumindest einer Teilmenge der Vielzahl signifikanter variabler Parameter und Bilden einer Reihe d-dimensionalen, Skalare umfassender Messvektoren daraus, die jeweils der mindestens einen Teilmenge signifikanter variabler Parameter entsprechen,

Ableiten von den Skalaren entsprechenden jeweiligen

Abnutzungsinkrementen,  
Modellieren der Abnutzungsinkremente durch ein neuronales Netz mit einer Gaußschen Basisfunktion mit M verborgenen Einheiten, wobei M ein freier Parameter ist, woraus sich ein lineares Gleichungssystem ergibt, Ermitteln der M Koeffizienten in einer überwachten Trainingsphase, die N Historien von Vorrichtungen beinhaltet, die ausfielen,

Berechnen der M unabhängigen Summen über alle Abnutzungsinkremente für jede Vorrichtung, wodurch eine (N×M)-Matrix und N Gleichungen für das virtuelle Alter jeder Vorrichtung erhalten werden, und Berechnen eines virtuellen Alters für jede Vorrichtung aus der (N×M)-Matrix und den N Gleichungen.

21. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 20 einschließlich eines Schritts der Normierung des virtuellen Alters auf eine gegebene Zahl.

22. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 20 einschließlich eines Schritts der Normierung des virtuellen Alters auf Eins.

23. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch y, wobei der Schritt des Modellierens der Abnutzungsinkremente durch eine Gaußsche Basisfunktion das Modellieren mit einer Funktion der Form

$$g(\bar{x}, \bar{z}, \sigma) = \exp\left(-\frac{\|\bar{x} - \bar{z}\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

umfasst, wobei  $g(\bar{x}, \bar{z}, \sigma)$  die Gaußsche Basisfunktion darstellt und  $\bar{x}$ ,  $\bar{z}$  und  $\sigma$  jeweils [Lakune] repräsentieren.

24. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 23 einschließlich eines Schritts des Auswählens der  $z_i$  durch Anwendung eines Cluster-Algorithmus auf die Messvektoren.

25. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 24 einschließlich eines Schritts der Anwendung eines Skalenfaktors, wodurch ein weiterer freier Parameter  $\lambda$  eingeführt wird, der durch Kreuzvalidierung auszuwählen ist, wodurch  $\sigma_i$  sich in  $\lambda\sigma_i$  umwandelt.

26. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 24 einschließlich eines Schritts der Normierung des virtuellen Alters auf eine gegebene Zahl.

27. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 24 einschließlich eines Schritts der Normierung des virtuellen Alters auf Eins.

28. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 24 einschließlich eines Schritts des Ableitens von  $\sigma_i$ , indem  $\sigma_i$  als globale Konstante eingesetzt wird.

29. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 24 einschließlich eines Schritts des Ableitens von  $\sigma_i$ , indem für  $\sigma_i$  der Durchschnitt des Abstands von jeder Messung zu der ersten nächsten Messung genommen wird.

30. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 24 einschließlich eines Schritts der Anwendung eines Skalenfaktors, wodurch ein weiterer freier Parameter  $\lambda$  eingeführt wird, der durch Kreuzvalidierung auszuwählen ist, wodurch  $\sigma_i$  sich in  $\lambda\sigma_i$  umwandelt.

31. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 30 einschließlich eines

Schritts der Normierung des virtuellen Alters auf eine gegebene Zahl.

32. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 31 einschließlich eines Schritts der Normierung des virtuellen Alters auf Eins.

33. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 29 einschließlich eines Schritts des Ableitens von  $\sigma_i$ , indem für  $\sigma_i$  der Durchschnitt des Abstands von jeder Messung zu der k-nächsten Messung genommen wird.

34. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 29 einschließlich eines Schritts der Anwendung eines Skalenfaktors, wodurch ein weiterer freier Parameter  $\lambda$  eingeführt wird, der durch Kreuzvalidierung auszuwählen ist, wodurch  $\sigma_i$  sich in  $\lambda\sigma_i$  umwandelt.

35. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 29 einschließlich eines Schritts der Normierung des virtuellen Alters auf eine gegebene Zahl.

36. Verfahren zur Bereitstellung der Schätzung eines virtuellen Alters nach Anspruch 29 einschließlich eines Schritts der Normierung des virtuellen Alters auf Eins.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

## Flussdiagramm zur virtuellen Altersschätzung auf der Basis eines neuronalen Netzes

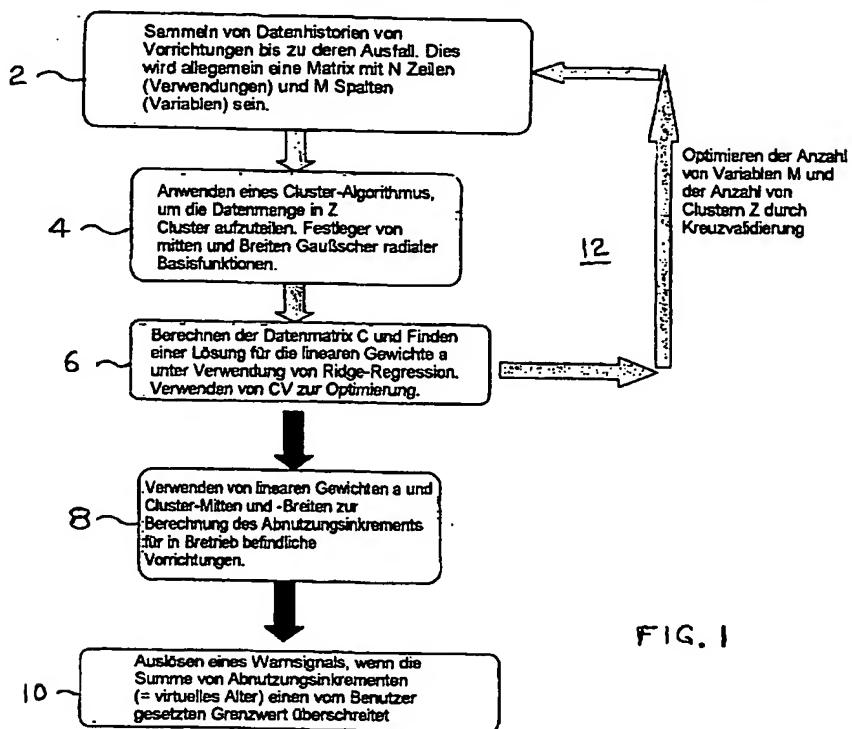


FIG. I

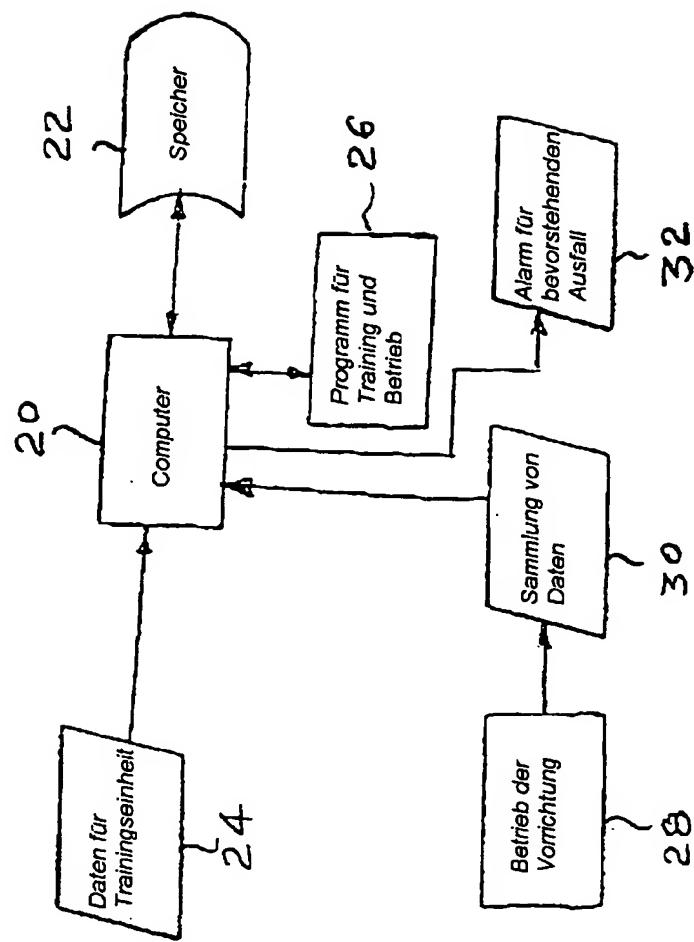


FIG. 2